



HAL
open science

Analyse multi-niveau de jonctions économiques par cloutage = Multi-level analysis of low-cost Z-pinned junctions

Javier Toral, Bruno Castanié, Jean-Jacques Barrau, Sébastien Didierjean

► **To cite this version:**

Javier Toral, Bruno Castanié, Jean-Jacques Barrau, Sébastien Didierjean. Analyse multi-niveau de jonctions économiques par cloutage = Multi-level analysis of low-cost Z-pinned junctions. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00429567

HAL Id: hal-00429567

<https://hal.science/hal-00429567>

Submitted on 3 Nov 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse multi-niveau de jonctions économiques par cloutage

Multi-level analysis of low-cost Z-pinned junctions

Javier Toral¹, Bruno Castanié², Jean-Jacques Barrau² et Sébastien Didierjean³

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader, ISAE,
F - 31055 Toulouse CEDEX

2 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UPS
F - 31062 Toulouse CEDEX
e-mail : bruno.castanie@isae.fr

3 : EADS Innovation Works, 18 rue Marius Terce, 31300 Toulouse, France

Résumé

Dans le cadre du projet européen ALCAS (Advanced Low-Cost Aircraft Structure), une solution de jonctionnement par Z-Pinning a été développée par EADS IW en collaboration avec Dassault Aviation. L'objectif de cette étude est de comprendre la nature des transferts d'efforts entre clous et structure afin de proposer une méthode de prédimensionnement de ce type de jonction qui fait défaut actuellement. Une approche multi-niveau a été proposée. Au premier niveau, une caractérisation des composants élémentaires (i.e. clous et résine) a été réalisée. Puis la nature de la liaison clou/structure a été analysée expérimentalement par arrachement de clous dans de la résine pure et modélisée analytiquement. La nature de la liaison est de type collage pur. Des essais d'arrachement de clous seuls dans un stratifié ont prouvé que la nature de cette liaison était identique dans une structure ce qui permet de prédire la tenue du clou en fonction son implantation. L'approche a ensuite été étendue à la modélisation par éléments finis d'essais d'éprouvettes technologiques de type L ou T sous sollicitations d'arrachement, de cisaillement et de « dépliage ».

Abstract

In the framework of european ALCAS program (Advanced Low-Cost Aircraft Structures), an innovative design of junctions by Z-pinning was developed by EADS Innovation Works and Dassault Aviation. The analysis of this new concept was performed using a multi-level approach. At the first level, Z-pins alone and resin were tested. Then the mechanical behavior between the Z-pin and the structure was analysed. First, pull-out tests of a single Z-pins molded in a block of resin were conducted. The mechanical link is pure bonding and an analytical model was used to predict the debonding load. Pull-out test of a single Z-pin in a laminate showed that the mechanical link is the same, enabling a computation of the strength of a Z-pin in a structure. Then, this analysis was used to develop finite element models of tests on L and T specimen subjected to pull-out, shear and bending loads.

Mots Clés : Cloutage, Joints T et L, Structures composites.

Keywords : Z-pinning, L-joints, T-joints, Composite structures.

1. Introduction.

Le cloutage des structures composites consiste à insérer un clou de carbone transversalement au plan du stratifié. La principale technologie disponible est celle initialement créée par la société AZTEC (maintenant ALBANY) qui insère des clous de très petites dimensions prisonniers d'une mousse par l'utilisation d'un pistolet à ultrason [1]. Cette technologie donne à la structure une résistance hors plan qui permet d'augmenter la tenue au délaminage donc à l'impact [1-5]. L'essentiel des recherches effectuées dans ce domaine sont relatives à cette technologie et des gains significatifs de tenue statique des interfaces ont été démontrés. La démonstration du renforcement de la tenue de l'interface a permis d'envisager des applications à la réalisation de T ou de L cloutés dans le retour de peau ou au renforcement de l'interface peau/raidisseur pour des applications aéronautiques [5-7]. Toutefois, de part la taille réduite des clous, cette

technologie ne permet pas d'envisager la réalisation de jonctions directes par transferts des efforts via ces clous. Aussi, EADS Innovation Works utilise des clous de dimensions relativement importante (à partir de 0.7 mm de diamètre et de 15 mm de longueur), torsadés et fournis par la société Hexcel [8]. Ces clous sont insérés dans une structure sèche par une machine 5 axes dotée d'une aiguille creuse vibrante (figure 1). La préforme cloutée est ensuite injectée en R.T.M.

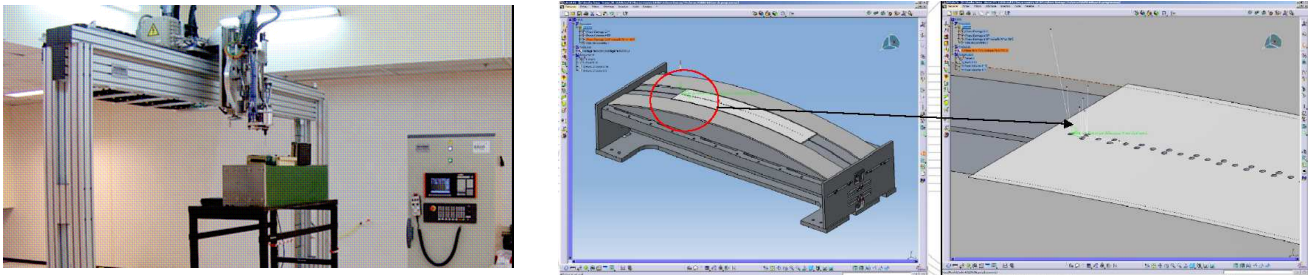


Fig. 1. Machine de cloutage EADS IW et plan de cloutage d'une préforme sèche [8].

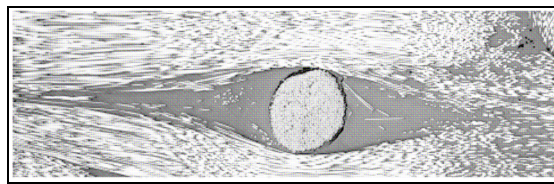


Fig. 2. Poches de résine autour d'un clou [10].

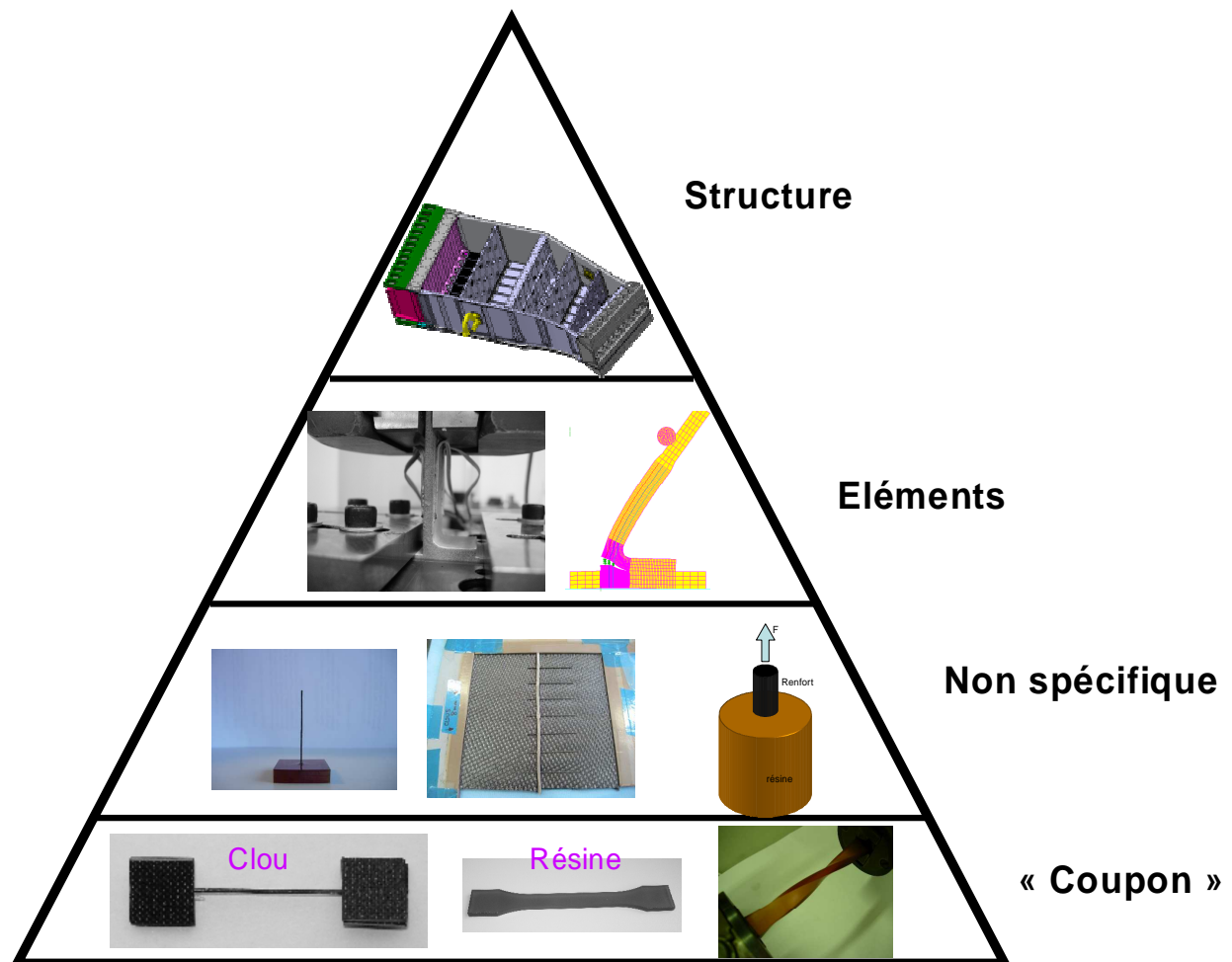


Fig. 3. Approche multi-niveau de l'analyse des jonctions cloutées [11].

L'analyse de la littérature a montré que l'insertion de clous dans une structure stratifiée était intrusive et provoquait un désalignement des fibres qui conduit à une baisse des caractéristiques mécaniques dans le plan [9] mais aussi à l'apparition de poches de résine autour du clou (figure 2) [10]. Cette observation qui est commune à toutes les technologies de cloutage conduit à postuler que la liaison clou/résine est fondamentale dans la nature de la transmission des efforts dans une jonction cloutée. Aussi, une démarche multi-niveaux a t-elle été proposée pour l'analyse du jonctionnement par cloutage (figure 3) avec pour finalité la détermination d'une méthodologie d'analyse tant expérimentale que numérique de dimensionnement de ces structures innovantes. Au niveau le plus bas, des caractérisations purement expérimentales ont été conduites sur le clou et la résine séparément. Le clou a été testé en traction pure et cisaillement et la résine en traction et cisaillement. Le clou montre un comportement non linéaire marqué qui peut être attribué au caractère torsadé de sa structure. Les essais de cisaillement se sont avérés peu concluant en terme de raideur mais ont quand même permis d'estimer la résistance à rupture du clou. Les essais de traction et de torsion sur des éprouvettes de résine pure ont montré le caractère isotrope de celle-ci et un comportement non linéaire peu marqué avant rupture. Le détail de ces analyses peut être trouvé dans [11]. Au second niveau de cette démarche, la liaison clou/résine puis clou stratifié a été analysée et modélisée. Cette étude sera présentée dans le paragraphe suivant. Enfin, l'analyse a été conduite jusqu'au niveau d'éprouvettes technologiques cloutées de type T ou L. Ces éprouvettes ont été sollicitées en arrachement, cisaillement et flexion et les essais et modélisations seront présentés paragraphe 3. Dans cette communication, on se restreindra aux sollicitations d'arrachement. On pourra trouver le détail des analyses dans le cas des sollicitations de cisaillement et de flexion dans [11] et [12]. Enfin au dernier niveau on trouve l'application envisagée dans le cadre du programme ALCAS : un caisson de voilure d'avion d'affaire qui ne peut être présenté dans cette communication.

2. Analyse de la liaison clou/structure

2.1 Etude de l'arrachement d'un clou dans de la résine.

La première partie de l'étude consiste à étudier la liaison clou/résine par arrachement d'un clou noyé dans de la résine. Les éprouvettes sont constituées d'un pavé de résine pure (résine époxy 977-20). Le clou est inséré avant polymérisation dans la résine liquide sur toute sa hauteur puis maintenu droit pendant la phase de polymérisation (fig. 4a). La hauteur du pavé de résine détermine la longueur d'enfoncement du clou, donc la longueur de collage. Lors de l'arrachement, l'éprouvette est mise en appui suivant le principe décrit figure 4b et sur un diamètre de 10 mm. Une pince spéciale a été conçue pour la prise du clou et les mesures en déplacement se font au plus près du clou via un comparateur à levier puis des capteurs LVDT [11]. Les paramètres analysés lors des essais d'arrachement de clous noyés dans la résine sont : hauteur de la résine (2 à 12 mm) et diamètres du clou (0,7 et 1,1 mm). Des essais à 50° C ont été aussi réalisés mais n'ont pas démontré une influence significative de la température.

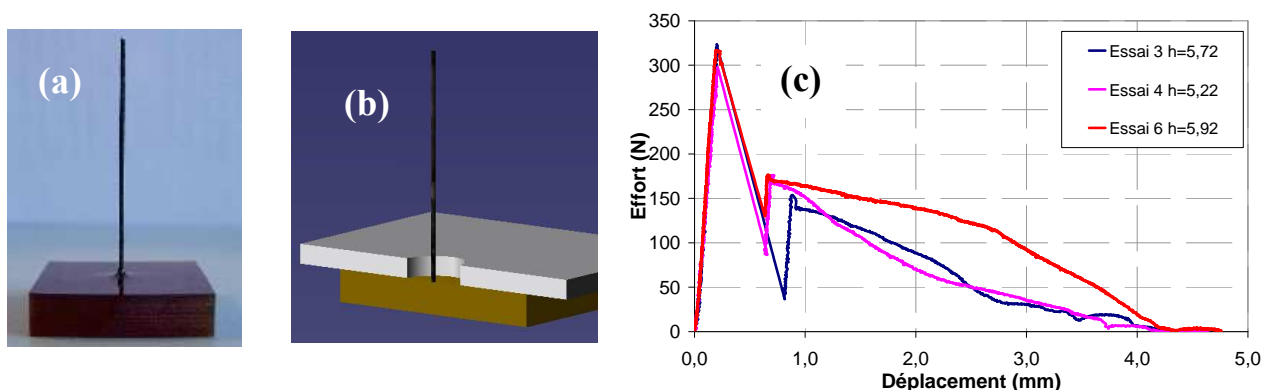


Fig.4. Essai d'arrachement de clou dans de la résine : (a) : Epreuve; (b) : Principe; (c) : Courbes typiques.

La fig. 4c montre une courbe typique de l'effort en fonction du déplacement lors d'un essai d'arrachement. On remarque trois phases différenciées : une première phase de déformation élastique du clou avant l'effort maximum suivie d'une chute d'effort brutale due à la rupture de l'interface clou/résine suivie finalement par la phase de déchaussement où l'effort de friction diminue à mesure que le clou sort du pavé de résine. Dans tous les essais réalisés, l'effort de déchaussement est supérieur à l'effort de friction. Ces trois phases décrites ci-dessus ont été observées lors des essais d'arrachement de clous carbone insérés dans le stratifié réalisés par Dai et al [13]. Le fait de retrouver le même comportement global donne un premier indice de similitude entre le clou noyé dans la résine et le clou inséré dans un stratifié. Le graphique de la fig. 5 montre l'évolution de la tenue divisée par le périmètre du clou (homogène à un flux en N/mm) en

fonction de la distance de collage pour les deux diamètres de clou testés. Tout d'abord, on remarque une dispersion très importante des résultats car, pour un enfoncement de 2 mm par exemple, on trouve des valeurs de tenue entre 70 et 140 N/mm. Cette dispersion est probablement due au fait que les clous présentent une surface extérieure irrégulière et à la présence de défauts de type porosité à l'interface clou/résine [11]. En terme de flux, compte tenu de la dispersion, aucune différence n'est notable pour les deux diamètres de clous. Aux points présents sur la fig. 5, on peut ajouter l'origine du graphique car, pour une distance de collage nulle, la tenue est elle aussi nulle. Ainsi, et malgré la dispersion, la tenue augmente rapidement avec la longueur de collage entre 0 et 4 mm pour, ensuite, connaître une croissance moins prononcée sur les longueurs d'entre 4 et 11 mm. Ce comportement est typique des liaisons collées où la tenue de la liaison sature à partir d'une distance de collage.

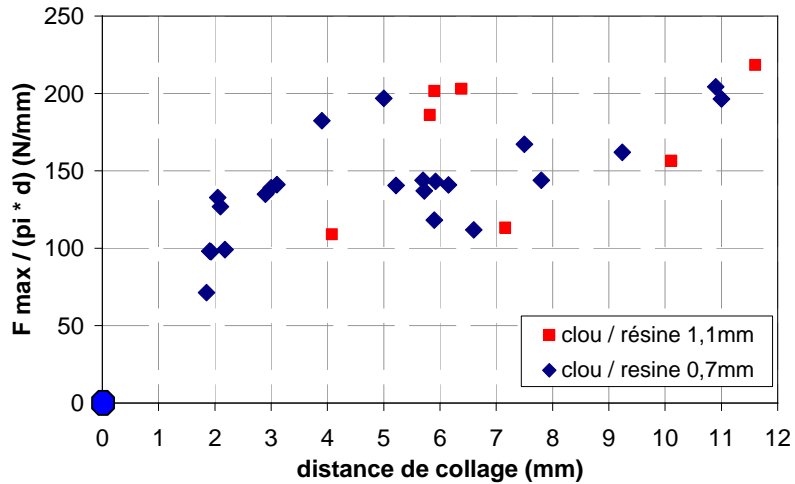


Fig.5. Flux d'arrachements des clous dans de la résine.

Cette dernière remarque a conduit à développer un modèle de collage qui est une adaptation à la problématique de l'essai de modèles de la littérature [14-15] développés initialement pour la simulation de l'arrachement d'une fibre seule dans de la résine.

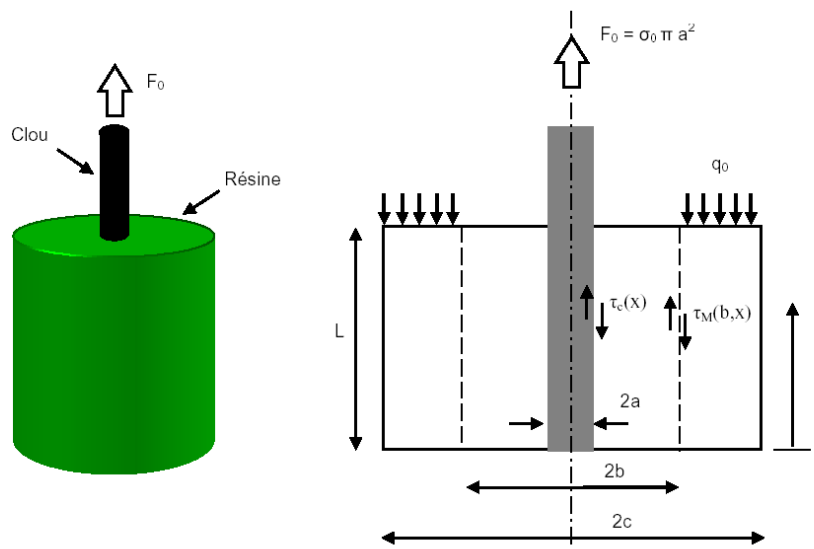


Fig.6. Modélisation de l'essai d'arrachement clou/résine.

Le développement de ce modèle repose sur les équilibres des différentes zones, les conditions aux limites en contraintes en périphérie et sur l'hypothèse que les contraintes radiales et circonférentielles sont négligeables par rapport aux contraintes axiales [11]. Ce modèle conduit à l'expression suivante des contraintes de cisaillement τ_c à l'interface clou/résine :

$$\tau_c(x) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{F}{\pi \cdot a \sinh(\lambda \cdot L)} \cosh(\lambda \cdot x)$$

Où λ est fonction des rayons a , b et c et des propriétés mécaniques du clou et de la résine, L est la longueur de collage et F la force d'arrachement. La force maximum d'arrachement F_{Max} peut s'exprimer en fonction de la contrainte de cisaillement maximale τ_{Max} :

$$F_{\text{max}}(L) = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \tau_{\text{max}} \tanh(\lambda \cdot L)$$

Seul reste à fixer τ_{Max} . Cette contrainte est déterminée en minimisant l'erreur de la courbe théorique par rapport aux points expérimentaux. On trouve ainsi un seuil de 58 MPa dont la courbe correspondante est tracée fig. 6. Le modèle analytique donne ainsi une courbe de référence de l'évolution de la tenue du clou en fonction de la distance de collage. La dispersion des valeurs d'essai rend difficile la validation de cette courbe mais elle suit correctement la tendance globale des efforts mesurés. On remarque cependant des divergences, notamment sur les distances de collage supérieures à 8 mm où le modèle semble sous-estimer la tenue mesurée en essai. Il est à noter que ce modèle a été confronté à un modèle éléments finis raffiné incluant le comportement non linéaire du clou et de la résine qui a donné des résultats très proches, validant ainsi les hypothèses effectuées ainsi que l'approche linéaire [11].

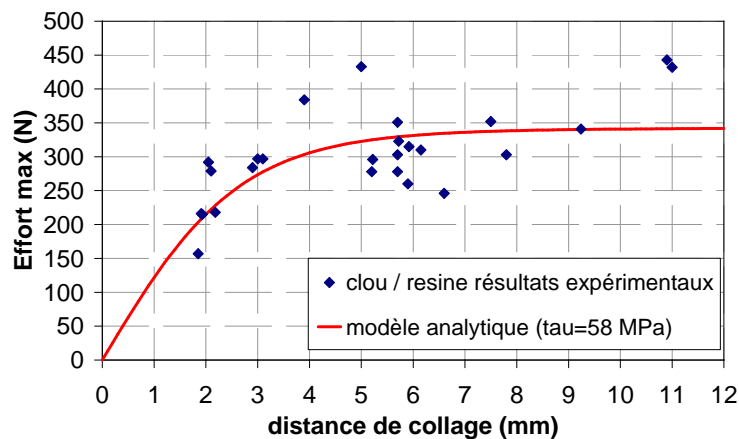


Fig.7. Comparaison modèle analytique /essais pour les clous de 0.7 mm de diamètre.

2.2 Etude de l'arrachement d'un clou dans un stratifié.

Les éprouvettes conçues pour cette étude sont composées de deux plaques stratifiées liées par un seul clou comme le montre la fig. 8a. Les plaques sont composées de 12 plis de tissu équilibré 914/G803 avec le clou situé au milieu de la séquence de drapage entre le sixième et le septième pli. Elles ont une épaisseur totale de 3,4 mm. Les plaques sont séparées entre elles par une cale en mousse de haute densité recouverte de téflon. Les clous utilisés pour cette étude sont les clous de 0,7 mm de diamètre et 40 mm de longueur. En positionnant le clou avant polymérisation, il est possible de faire varier la longueur d'enfoncement du clou (L) de 3 à 20 mm (fig. 8(b)).



Fig.8. Eprouvettes d'arrachement de clou dans stratifié : principe (a) ; fabrication (b).

Les essais d'arrachement sont réalisés sur une machine d'essai INSTRON 10kN. Lors de l'essai, l'effort appliqué et le déplacements des mors sont mesurés [11]. Les courbes d'arrachement dans le cas d'un clou enfoncé de 15 mm sont données fig. 9. Un zoom a été effectué de manière à mettre en évidence le comportement avant friction du clou dans le stratifié. Comparativement aux essais dans de la résine pure, un comportement non linéaire apparaît avant la chute franche de la charge. Il a pu être montré grâce à des coupes micrographiques sur des essais arrêtés et à une comparaison aux courbes de traction du clou que

ce comportement correspond à une fissuration progressive de l'interface entre le clou et le stratifié. Un comportement globalement analogue a été observé pour les différentes longueurs d'implantation.

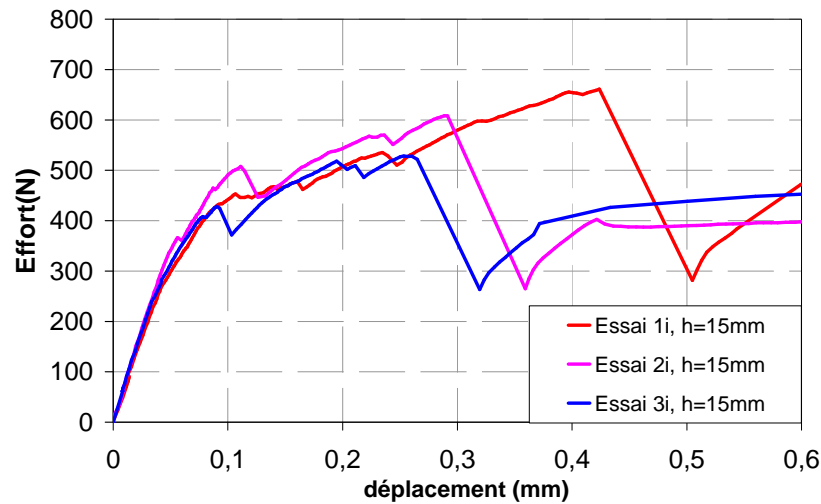


Fig.9. Courbes typiques effort d'arrachement / déplacement du clou dans le stratifié.

La comparaison de la force d'arrachement correspondant à l'initiation de la fissuration à l'interface clou/stratifié (i.e. la charge correspondant à la perte de linéarité) avec les résultats des essais et du modèle analytique est présentée fig. 10. Il apparaît que l'effort de fissuration du clou dans le stratifié est comparable à la tenue du clou dans la résine et ce malgré la dispersion. Le même phénomène d'augmentation très faible de l'effort de fissuration sur des distances supérieures à 6 mm est observé. Cette observation indique que la fissuration de l'interface clou/résine ou clou/stratifié se produit au même niveau d'effort. Dans le cas du clou noyé dans la résine, cette fissuration provoque le déchaussement brutal et complet du clou et la perte de la tenue tandis que dans le cas du clou dans le stratifié une fissure se propage d'abord avant que le clou ne déchausse complètement. Ainsi, l'effort de fissuration du clou implanté dans le stratifié peut être étudié par des essais simples d'arrachement de clou noyé dans la résine. De plus, le modèle analytique présenté dans le paragraphe précédent permet d'estimer aussi la tenue du clou dans le stratifié et donc de renseigner des modélisations à l'échelle de la structure.

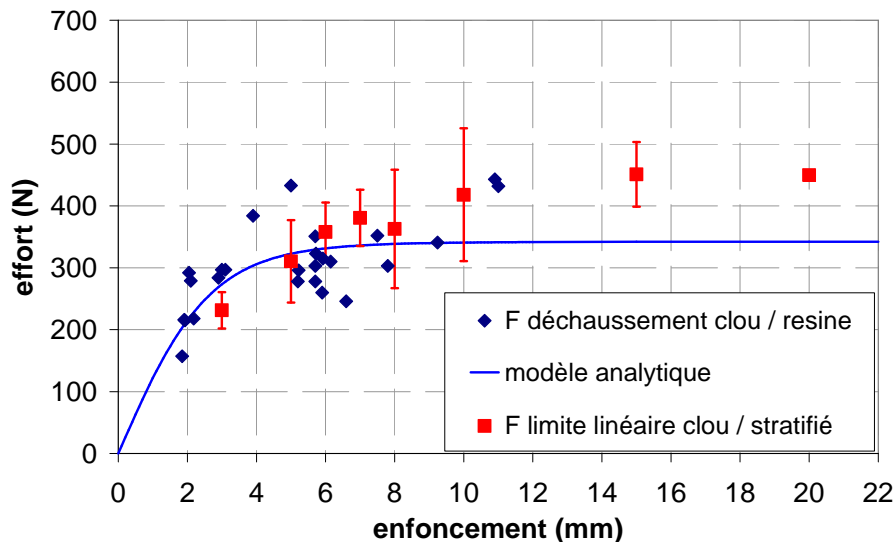


Fig.10. Comparaison de la tenue du clou noyé dans la résine avec l'effort de fissuration du clou implanté dans le stratifié.

3. Analyse de structures cloutées sous sollicitation d'arrachement.

3.1 Description des éprouvettes et de l'essai.

Les éprouvettes T et L joints sont stratifiées avec des tissus secs UD PRIFORM IMS 200 et PRIFORM HTS-450 fournis par CYTEC. Une fois la préforme sèche assemblée dans son moule, le cloutage est effectué par EADS IW (fig.1 et [8]). Les clous ont une longueur de 15 ou 40 mm et un diamètre de 0.75

mm. Après insertion des clous, l'âme devient plus épaisse dans la zone cloutée ce qui doit être anticipé lors du dessin du moule. Une barre de 360 mm de long est injectée par Dassault Aviation puis découpée en éprouvettes de 30 mm de large. Chaque éprouvette est renforcée par approximativement 18 clous disposés en quinconce (fig. 11). Trois éprouvettes sont testées pour chaque configuration :

- L non clouté
- L clouté
- T cloutés, clous longs (40 mm)
- T cloutés, clous courts (15 mm)

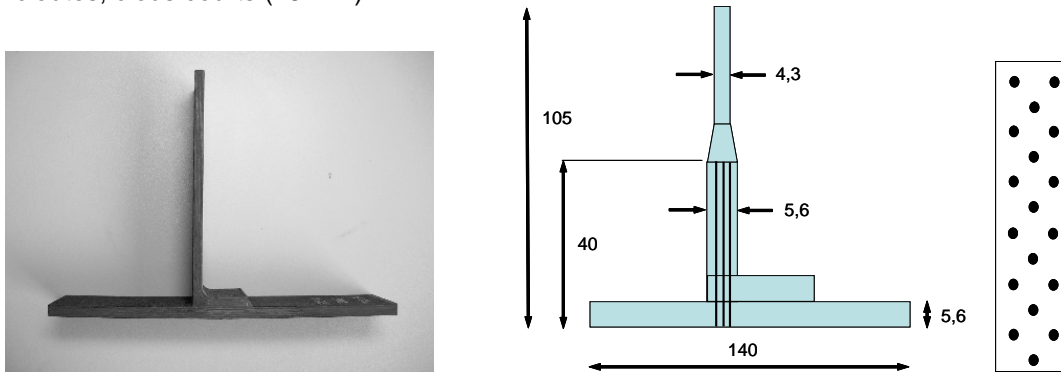


Fig. 11. Eprouvettes en L cloutées.

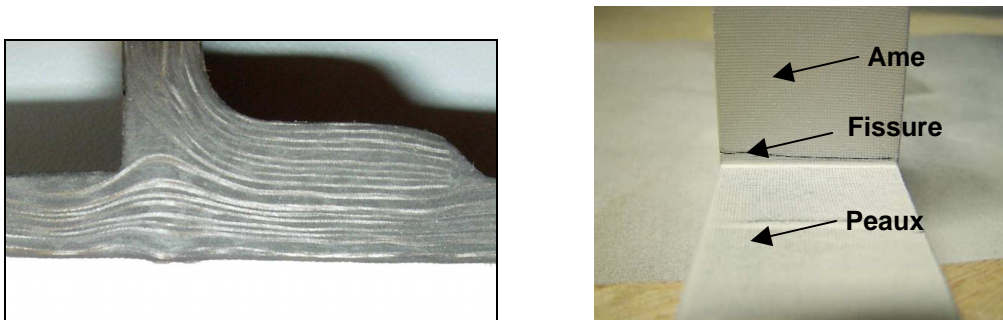


Figure 12. a) Ondulations dues à l'insertion des clous, b) Fissures des éprouvettes cloutées en L.

L'examen des éprouvettes avant essai a montré la présence d'ondulation dans la peau générées par l'insertion des clous (fig. 12a). De plus, beaucoup d'éprouvettes se sont révélées fissurée à la jonction âme/peau dans une zone riche en résine (fig. 10b). L'origine thermique de cette fissuration lors du refroidissement a pu être démontrée numériquement [11].

L'essai d'arrachement consiste à appliquer un effort vertical sur l'âme tout en maintenant la peau encastrée (fig. 13). La distance d'encastrement est de 3mm pour les éprouvettes en L et 10 mm pour les éprouvettes en T. L'âme est prise directement dans le mors au-delà de zone cloutée. Une machine Instron de 100KN est utilisée. Quatre jauges de déformations sont collées sur l'âme. Un système de corrélation d'image est utilisé pour filmer les champs des éprouvettes et détecter l'apparition des endommagements.

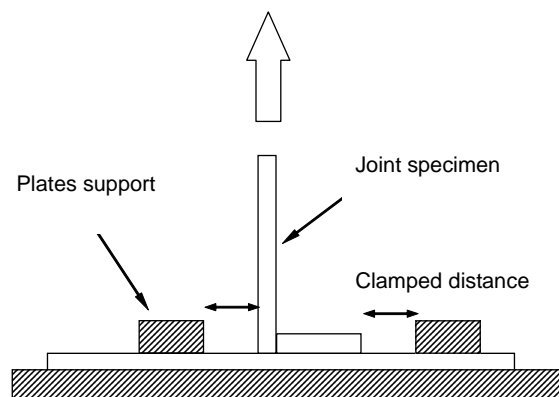


Fig 13. Essai d'arrachement.

La figure 14 montre les courbes efforts déplacements obtenues. Pour les L non cloutés (fig. 14a), dès 1590 N, une fissure apparaît à l'interface âme/peau et se propage rapidement. Pour les L cloutés, la fissure étant déjà présente à cause de problèmes de fabrication, l'initiation de l'endommagement ne peut donc être détecté. Toutefois cette fissure progresse continûment dès 1500 N environ. A 5800N, les clous déchaussent et la fissure progresse brutalement de 1 à 15 mm à l'interface peau/âme. Simultanément, la charge chute brutalement et on retrouve sur ces éprouvettes le phénomène de friction du clou. D'un point de vue purement statique, la charge maximale d'arrachement a été multipliée par 4 par la présence des clous. Pour les éprouvettes en T, le comportement est similaire pour des clous longs ou courts car pour toutes les configurations, les clous décollent de la peau et non de l'âme.

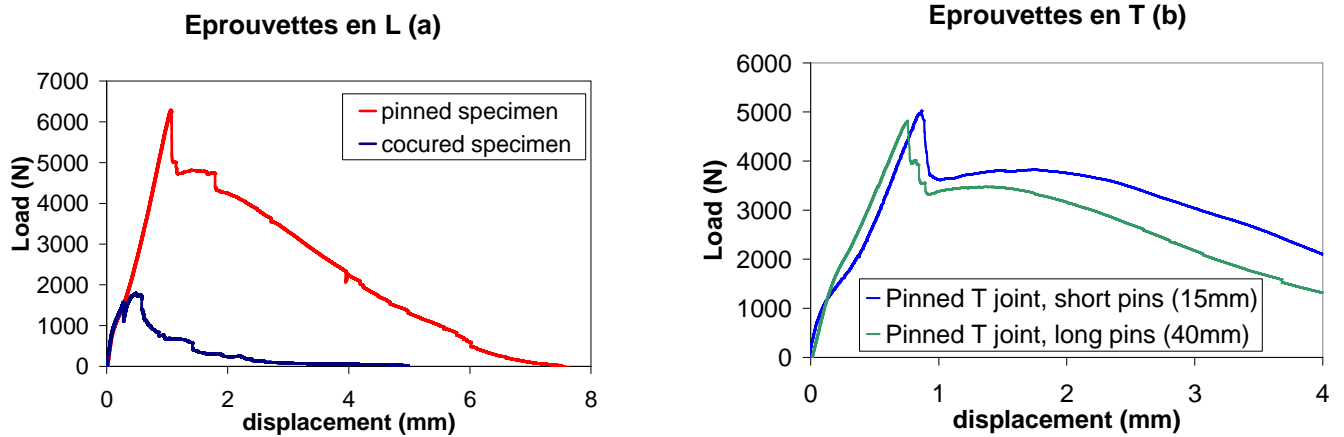


Fig. 14. Courbes efforts/déplacement pour éprouvettes en L non cloutée et cloutée (a) et pour éprouvettes en T clous courts et longs.

3.2 Modélisation éléments finis de l'essai d'arrachement sur L et T cloutés.

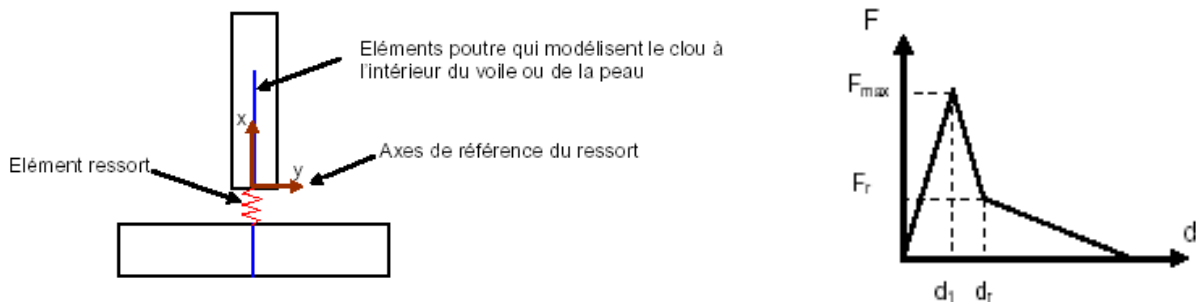


Fig. 15. Principe de modélisation (a) et loi d'arrachement.

Le principe de modélisation est décrit fig. 15a. Les éléments qui simulent le déchaussement des clous mais aussi le cisaillement sont des ressorts non linéaires de type BUSH [16] qui permettent de relier les 6 d.d.l. des 2 nœuds. La loi non linéaire en arrachement est présentée fig. 15b. L'effort maximal F_{Max} est déterminé par le modèle analytique présenté précédemment en fonction de l'épaisseur de la peau. L'effort résiduel est proportionnel à ce qui a pu être observé en essai (cf. fig. 4). La raideur dans le domaine élastique est déterminée à partir des essais sur clous seuls [11] et le déplacement d_r est fixé arbitrairement au double de d_1 . Le modèle d'arrachement a pour objectif de calcul la tenue de la jonction (charge extrême). Dans cette optique, on suppose que les efforts transitent seulement par les clous et ainsi on ne modélise pas l'interface de résine entre la peau et le pied de nervure (fig. 16). Cette hypothèse est basée sur les résultats expérimentaux présentés où on a vu que les jonctions cloutées supportent des efforts jusqu'à quatre fois supérieurs à ceux des jonctions non cloutées et que la fissuration de l'interface est préliminaire au déchaussement des clous. La figure 17 montre les courbes effort/déplacement obtenues par simulation et par essai pour un L clouté. Malgré une raideur légèrement plus importante de la simulation, un bon accord est observé entre les deux courbes, notamment au niveau de l'effort maximum. La différence de raideur peut s'expliquer par le fait que l'encastrement de la peau lors des essais n'est pas parfait. En effet, un serrage trop important des plaques de fixation introduit sur les éprouvettes des surcontraintes à l'interface peau/voile. Afin d'éviter cette sollicitation parasite, il a été choisi d'appliquer un serrage léger. La courbe de l'effort calculé par simulation présente une irrégularité sur la montée à 4760N. Cette irrégularité correspond au déchaussement de la ligne de cloutage la plus extérieure. Ainsi, à partir de cette charge, les clous de la première ligne transmettent les efforts seulement par friction. La simulation permet ainsi d'estimer le moment

de déchaussement des premiers clous qui pourrait correspondre à l'effort limite de l'assemblage. On a vu sur les résultats expérimentaux que cet effort est difficile à évaluer par la présence de fissures sur les éprouvettes avant essai. La tenue maximale calculée avec le modèle, de 5343 N, est seulement 5% inférieure à la tenue moyenne mesurée en essai de 5598 N. L'écart est inférieur à la dispersion expérimentale. La même méthodologie a été appliquée aux T cloutés et la charge à rupture calculée est 5540 N, 10 % au-dessus de la charge expérimentale. Au bilan, l'application de la méthodologie de calcul de la tenue d'un clou seul permet une bonne estimation de la tenue d'une structure cloutée sous sollicitation d'arrachement.

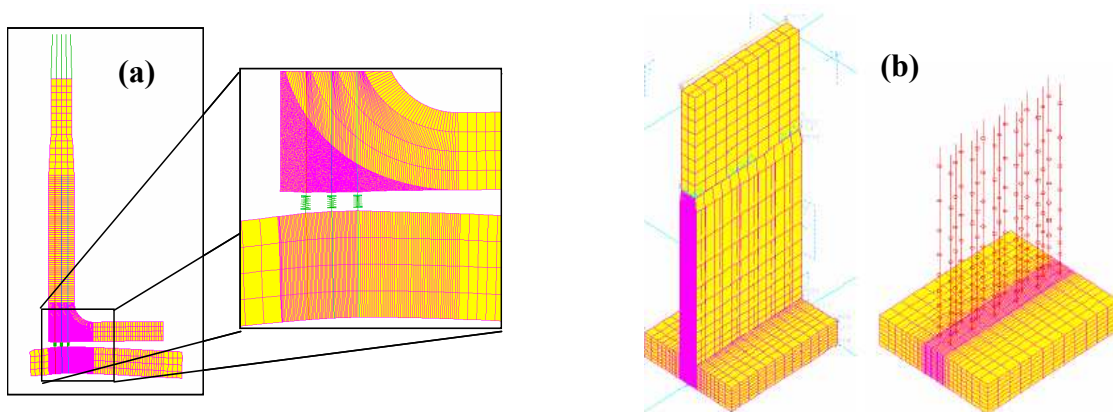


Fig. 16. Modèles de L (déformée) et T cloutés.

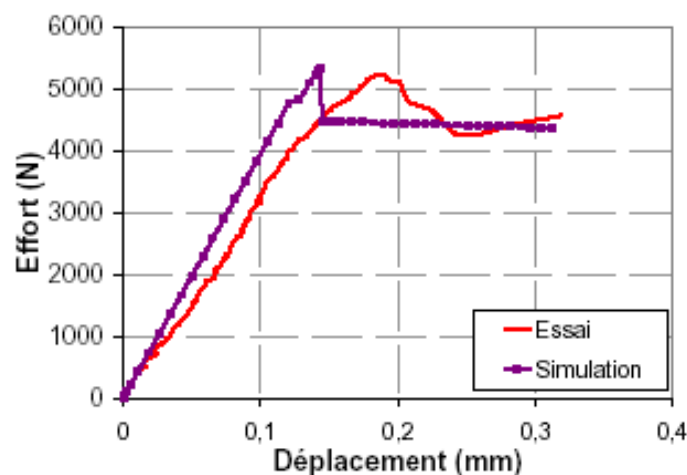


Fig. 17. Comparaison essai/simulation de l'arrachement d'un L clouté.

4- Conclusions

Une approche multi-niveau a été proposée pour l'analyse des structures cloutées. Il a été démontré que la liaison clou/structure est de type collage et que la présence de plis adjacents n'a qu'un effet mineur pour l'initiation du déchaussement. De ce fait, un modèle analytique a été proposé pour déterminer la charge de déchaussement du clou. Celui-ci nécessite un seul essai de recalage d'arrachement d'un clou dans un pavé de résine pure. Cette première étape permet de renseigner des modèles éléments finis de structures cloutées de niveau supérieur, en l'occurrence des L et des T pour cette étude. La corrélation des essais d'arrachement s'est avérée correcte mais c'est aussi le cas pour les sollicitations de cisaillement et de flexion [11] ce qui valide la démarche proposée. Toutefois les modèles éléments finis restent complexes et le passage à l'échelle de grandes structures nécessiterait certainement le développement d'éléments finis ad hoc.

Remerciements

Ce travail fait partie du FP6 du projet européen ALCAS. Les auteurs tiennent à remercier les personnels d'EADS IW et de Dassault Aviation qui nous ont fourni les éprouvettes cloutées.

Références

- [1] I.K. Partridge and D.D.R. Cartié, "Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance", *Composites Part A* 2005 Vol. 36(1): 55-64.
- [2] Childress JJ, Freitas GA, z-direction pinning of composite laminates for increased survivability. 1992 Aerospace design conference.
- [3] Clark A, Greenhalgh E, Meeks C, Jones C, Enhanced structural damage tolerance of CFRP primary structures by z-pin reinforcement. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. April 2003.
- [4] Yann W, Liu Hy, Mai YW, Numerical study on the mode I delamination toughness of z-pinned laminates. *Composites Science and Technology* 2003, Vol 63 : 1481-1493.
- [5] Mouritz A. P. Review of z-pinned composite laminates. *Composites Part A* 2007 Vol 38(12): 2383-2397
- [6] Cartié D.D.R., Dell'Anno G., Poulin E., Partridge I.K., 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z-pinning and tufting, *Engineering Fracture Mechanics* 73, pp 2532-2540, 2006.
- [7] Chang P, Mouritz AP, Cox BN, "Properties and failure mechanisms of pinned composites lap joints in monotonic and cyclic tension", *Composites Part A* 2006 Vol 37(10), 1501-1513.
- [8] Lefebure P. « Experimental assembly of dry Carbon Preforms by a Z-Pinning Technology ». SAMPE Europe Technical conference. SETEC 01/06.
- [9] Mouritz AP. Compression properties of Z-pinned composite laminates. *Composites Science and Technology* 2007 Vol 67(15-16) : 3110-3120
- [10] Sweeting R.D., Thomson R.S. The effect of thermal mismatch on Z-pinned laminated composite structures. *Composite Structures* 2004 Vol 66 : 189-195.
- [11] Toral Vasquez Javier. Identification et modélisation du comportement des structures composites assemblées par cloutage. Thèse Université de Toulouse. <http://theses.supaero.fr/00????.pdf>
- [12] Toral Vasquez J., Castanié B., Barrau J.J., Didierjean S. Experimental analysis and modeling of z-pinned joints under pull-out, shear and flexural loading. 4TH international conference on composite testing and model identification, Dayton, Ohio, 20-22 October 2008.
- [13] Dai SC, Yan W, Liu HY, Mai YW, Experimental study of z-pin bridging law by pullout test. *Composites Science and Technology* 2004 vol 64 : 2451-2457.
- [14] Zhang X, Liu HY, Mai YW, Diao XX, On steady-state fibre pull-out I The stress field. *Composites Science and Technology* 1999 Vol 59 : 2179-2189.
- [15] Fu SY, Yue CY, HU X, Mai YW. Analyses of the micromechanics of stress transfer in single and multi-fiber pull-out test. *Composites Science and Technology* 2000 Vol 60 : 569-579.
- [16] Samcef users guide. Samtech, Liège, Belgique.